

DOI 10.15589/jnn20180307

УДК 669-15

Д79

## THE INFLUENCE OF TYPE OF COMBINED DEFORMATION ON POLIGONIZATION SUBSTRUCTURE OF IRON AND STEEL U8

## ВПЛИВ ВИДУ КОМБІНОВАНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ПОЛІГОНІЗАЦІЙНУ СУБСТРУКТУРУ ЗАЛІЗА ТА СТАЛІ У8

**Oleksandr M. Dubovoy**

oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2843-1879

**Tetiana O. Makruha**

tmakruha@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8841-1699

**О. М. Дубовий**

д-р техн. наук, проф.

**Т. О. Макруха**

пров. фахівець

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

**Abstract.** The influence of the combined deformation on the thermal stability of the polygonization substructure of the technically clean iron and U8 (Y8) instrumental steel are shown. Therefore, the purpose of the work is to find the possibility of fixation of stabilization of the polygonization substructure by combined deformation. The hardness, size of coherent scattering area, quantity of nanostructured elements and the angle of disorientation of subgrains of technically clean iron and U8 instrumental steel before after deformation and pre-recrystallization heat treatment are experimentally investigated. The possibility of the thermal stabilization of the polygonization substructure during pre-recrystallization heat treatment of the Fe and steels by using combined deformation is established. The impact of the decrease of the sizes of the regions of the coherent scattering on the values of the physical and mechanical properties, such as hardness (which increases by at least 10 %), is proved. The combined deformation allows using this method for manufacture of machine parts and appliances.

**Keywords:** technically pure iron; steel U8; instrumental steels; combined deformation; pre-recrystallization heat treatment; substructure elements; hardness.

**Анотація.** Розглянуто вплив комбінованого деформування на термічну стабільність полігонізаційної субструктури заліза та інструментальної сталі У8. Таким чином, метою роботи є встановлення можливості фіксації стабілізації полігонізаційної субструктури шляхом комбінованого деформування (динамічне деформування на 30 % та статичне деформування на 30 %). Експериментально досліджені твердість, розмір областей когерентного розсіювання, кількість наноструктурних елементів і кут дезорієнтації субзерен технічно чистого заліза й сталі У8. Установлено можливість термічної стабілізації полігонізаційної субструктури в процесі передрекристалізаційної термічної обробки після попередньої комбінованої деформації (динамічне деформування на 30 % та статичне деформування на 30 %).

**Ключові слова:** технічно чисте залізо; сталь У8; інструментальні сталі; комбіноване деформування; передрекристалізаційна термічна обробка; субструктурні елементи; твердість.

**Аннотация.** Рассмотрено влияние комбинированного деформирования на термическую стабильность полигонизационной субструктуры железа и инструментальной стали У8. Таким образом, целью работы является установление возможности фиксации стабилизации полигонизационной субструктуры путем комбинированного деформирования (динамическое деформирование на 30 % и статическое деформирование на 30 %). Экспериментально исследованы влияние размера областей когерентного рассеивания, количества наноструктурных элементов и угла разориентировки субзерен на твердость технически чистого железа и стали У8. Установлена возможность термической стабилизации полигонизационной субструктуры в процессе передрекристаллизационной термической обработки после предварительной комбинированной деформации (динамическая деформация на 30 % и статическая деформация на 30 %).

**Ключевые слова:** технически чистое железо; сталь У8; инструментальные стали; комбинированное деформирование; передрекристаллизационная термическая обработка; субструктурные элементы; твердость.

## REFERENCES

- [1] Dubovyi, O. M., Yankovec, T. A., Lebedieva, N. Yu., Kazymyrenko, Yu. O., Zhdanov, O. O., & Bobrov, M. M. (2011). *Patent Ukrainy 95378. Mykolaiv: Natsionalnyi universytet korablebuduvannia imeni admiralak Makarova* [UA Patent No. 95378. Mykolaiv. Admiral Makarov National University of Shipbuilding].
- [2] Dubovyi, O. M., Yankovec, T. A., Shkurat, S. I., & Zhdanov, O. O. (2010). Doslidzhennia mozhlyvostei pidvyshchennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei napylenykh pokryttiv [Research opportunities to improve the physical and mechanical properties of sprayed coatings]. *Elektronnyi visnyk NUK* [Electronic Bulletin of NUOS], 2, 7-11.
- [3] Dubovyi, O. M., Lebedieva, N. Yu., & Yankovec, T. A. (2010). Vplyv peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvosti napylenykh pokryttiv ta deformovanykh metaliv ta splaviv [Effect of pre-recrystallization heat treatment on physical and mechanical properties of sprayed coatings and deformed metals and alloys]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* [Metallurgy and metal processing], 3, 7-10.
- [4] Dubovyi, O. M., Kulik, S. G., Zhdanov, O. O., Bobrov, M. M., & Myrko, O. I. (2011). Vplyv deformatsii ta lehuiuchykh elementiv na tverdist stalei i napylenykh pokryttiv pislia peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky [Influence of deformation and alloying elements on the hardness of steels and spray coatings after pre-recrystallization heat treatment]. *Zb. nauk. pr. NUK* [Collection of scientific works of NUOS], 2, 36-44.
- [5] Dubovyi, O. M., Zhdanov, O. O., & Gorban, O. V. (2014). Mozhlyvosti stabilizatsii polihonizatsiinoi substrukturny splavu D16 [Possibilities of stabilization of the polygonal substructure of the alloy D16]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* [Metallurgy and metal processing], 2 (70), 34-39.
- [6] Dubovyi, O. M., Bondarenko, A. V., Zhdanov, O. O., Zhyzhko, O. V., Bobrov, M. M., & Galkina, T. S. (2012). Vplyv peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na substukturu i tverdist deformovanykh kolorovykh metaliv i splaviv ta napylenykh pokryttiv [Influence of pre-recrystallization thermal treatment on substructure and hardness of deformed non-ferrous metals and alloys and spray coatings]. *Zb. nauk. pr. NUK* [Collection of scientific works of NUOS], 2 (443), 47-53.
- [7] Dubovyi, O. M., Lebedieva, N. Yu., Yankovec, T. A., Karpechenko, A. A., & Zhdanov, O. O. (2010). Doslidzhennia mozhlyvostei pidvyshchennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei deformovanykh metaliv i splaviv termichnoiu obrobkoiu [Investigation of the possibilities of increasing the physical and mechanical properties of deformed metals and alloys by thermal treatment]. *Zb. nauk. pr. NUK* [Collection of scientific works of NUOS], 3 (432), 69-79.
- [8] Bejly, Dzh. E. (1968). *Elektronnomikroskopicheskie nablyudeniya protsessov vozvrata i rekrystalizatsii v naklepennykh metallakh* [Electron microscopic observations of the processes of return and recrystallization in cold-worked metals]. M.: Metallurgiya.
- [9] Chashhuxyna, T. Y., Degtyarev, M. V., & Voronova, L. M. (2001). Vliyanie sposoba deformatsii na izmenenie tverdosti i struktury armko-zheleza i konstruktsionnoy stali pri deformirovanii i posleduyuschem otzhige [The effect of the deformation method on the change in hardness and structure of Armco iron and structural steel during deformation and subsequent annealing]. *FMM*, 5, 75-83.
- [10] Novykov, Y. Y. (1978). *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]. M.: Metallurgiya.
- [11] Baloyan, B. M., Kolmakov, A. G., Alymov, M. Y., & Krotov, A. M. (2008). *Nanomaterialyi: Klassifikatsiya, osobennosti svoystv, primeneniye i tekhnologii polucheniya. Uchebnoye posobie* [Nanomaterials: Classification, features of properties, application and technology of production: Tutorial]. Mezhdunarodnyi universitet prirody, obschestva i cheloveka «Dubna» [International University of Nature, Society and Man “Dubna”].
- [12] Zhdanov, O. O. (2015). *Zakonomirnosti vplyvu peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvosti deformovanykh stalei* [Patterns impact pre-recrystallization heat treatment on physical and mechanical properties of deformed steel]: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk.: spets. 05.02.01 – «Materialoznavstvo» / Zhdanov Oleksandr Oleksandrovych. – Kherson.
- [13] Konovalov, A. V., & Smyrnov, A. S. (2015). Vliyanie dinamicheskogo deformatsionnogo starenia splava AMg6 na soprotivleniye deformatsii. [The effect of dynamic strain aging of the AMg6 alloy on the strain resistance]. *Fiziko-himicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* [Physico-chemical kinetics in gas dynamics].
- [14] Gorelik, S. S., Dobatkin, S. V., & Kaputkina, L. M. (2005). *Rekrystalizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. M.: MISIS.

- [15] Almyasheva, O. V., Fedorov, B. A., Smyrnov, A. V., & Gusarov, V. V. (2010). Razmer, morfologiya i struktura chastits nanoporoshka dioksida tsirkoniya, poluchennogo v gidrotermal'nykh usloviyakh [Size, morphology and structure of particles of zirconium dioxide nanopowders obtained in hydrothermal conditions. *Nanosistemy: fizika, himiya, matematika* [Nanosystems: physics, chemistry, mathematics], 1, 26-36.
- [16] Dolgusheva, E. B., & Trubiczin, V. Yu. (2010). Vliyanie razmera i formy svobodnykh nanochastits na lokalnye izmeneniya parametra reshetki i strukturnuyu stabilnost OTsK-Zr i Fe [Nanoparticles on Local Changes in the Lattice Parameter and Structural Stability of Bcc-Zr and Fe]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of Solid State], 52, 6, 1163-1171.
- [17] Marahova, A., Zhilkina, V., Blynskaya, E., Alekseev, K., & Stanishevsky, J. (2016). Opredelenie razmerov nanochastits v kolloidnykh rastvorakh metodom dinamicheskogo rasseyaniya sveta [Determination of the sizes of nanoparticles in colloidal solutions by the method of dynamic light scattering]. *Nano Industriya* [Nano Industry], 1/63, 88-93.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблемою сучасного машинобудування є підвищення надійності та ресурсу роботи деталей машин і механізмів. Це вимагає постійного їх удосконалення, застосування нових матеріалів. Експлуатаційні характеристики деталей машин у цілому, їх ресурс роботи визначаються переважно фізико-механічними властивостями металів і сплавів, з яких вони виготовляються. Для вирішення даної проблеми використовують здебільшого сталі й сплави з підвищеними показниками міцності, зокрема твердості. Підвищення фізико-механічних показників можливе за рахунок передрекristалізаційної термічної обробки (ПТО), яка забезпечує формування здрібненої і нанорозмірної субструктури [1–3]. Для вирішення цієї проблеми розроблено спосіб деформаційної та термічної обробки металів і сплавів, що включає у себе попередню деформацію металу або сплаву з наступною термічною обробкою. Метали або сплави деформують зі ступенем обтискування більше 70 % за температури навколишнього середовища, нагрівають до температури початку рекристалізації, витримують протягом 0,5...10,0 хв з наступним охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка не викликає росту рекристалізаційних зерен. Однак даний спосіб має недолік, пов'язаний з малим часом витримки (до 10 хв), за якого забезпечуються максимальні значення твердості матеріалу, що ускладнює, а в деяких випадках і унеможлиблює його застосування, особливо для масивних деталей.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У даний час найбільш поширеними металевими матеріалами залишаються сплави на основі заліза – сталі. Підвищення працездатності сталевих виробів визначає, в основному, розвиток сучасної техніки. На сьогодні майже повністю вичерпані можливості підвищення фізико-механічних властивостей сталей за допомогою традиційної термічної обробки та інших методів. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є розробка нетрадиційних методів

отримання сталей з унікальними фізико-механічними властивостями. Досягається це переважно здрібненням структури (субструктури). Тому здрібнення субструктури інструментальних сталей за допомогою передрекristалізаційної термічної обробки є ефективним напрямом підвищення їх працездатності [1].

На кафедрі матеріалознавства та технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова було розроблено спосіб деформаційно-термічної обробки [3–7], що забезпечує підвищення твердості деформуванням, обтискуванням металів і сплавів з наступною термічною обробкою, яку назвали передрекristалізаційною. Суть способу полягає у формуванні полігонізаційної субструктури шляхом нагрівання металів і сплавів до температури початку первинної рекристалізації з короткочасною (до 10 хв) витримкою та наступним охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю, яка унеможлиблює ріст субзерен (не менше 5 °C/c). Цей спосіб дозволяє підвищити, наприклад, твердість технічно чистого заліза на 30...70%. При цьому нагрівання вище від температури початку первинної рекристалізації або тривала витримка за температури, яка близька до неї, призводить до нівелювання отриманих результатів через розвиток процесів збиральної полігонізації. Дислокаційні границі субзерен, які утворюються при полігонізації, рухомі й при підвищенні температури легко переміщуються, при цьому збільшується розмір субзерен і, як наслідок, зменшуються твердість, міцність. Усе це унеможлиблює ПТО деталей великого (більше 10 мм) перерізу [5].

Процес рекристалізації є структурно чутливим, тому спосіб деформації, діючи на дислокаційну структуру металів та сплавів, буде визначати і здатність до полігонізації. Різниця в структурі, отриманій за різних швидкостей деформації, призводить до того, що при одній і тій же величині деформації початок рекристалізації (полігонізації) зі збільшенням швидкості деформування розвивається за більш низьких температур та проходить інтенсивніше [8; 9]. Розмір зерен після рекристалізаційного відпалу також

змінюється з видом напруженого стану: зразок, який піддавали динамічній деформації, має середній розмір зерен у 3 рази більший, ніж після статичної [10]. Вплив схеми напруженого стану на рекристалізацію автор роботи [10] пов'язує з різною щільністю дислокацій, які утворюються після різних способів деформування. Визначення щільності дислокацій у сталях після статичної та динамічної деформації показали, що щільність дислокацій після динамічної дії приблизно в 1,3 рази більша, ніж після статичного [11].

У роботах [12; 13] порівняно вплив статичного деформування і динамічного з наступною ПТО та показано, що динамічна деформація призводить до нерівномірного розподілу зерен за розміром по об'єму всього зразка, що ускладнює можливість фіксації полігонізаційної субструктури, що, в свою чергу, призводить до зниження приросту твердості після передрекристалізаційної термічної обробки у порівнянні зі статичним деформуванням. Тому з метою підвищення рівня термічної стабілізації полігонізаційної субструктури доцільно дослідити вплив різних видів комбінованого деформування.

#### ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на переваги дослідження впливу комбінування динамічної та статичної деформацій, ще недостатньо вивчено вплив різновидів комбінованого деформування на твердість, зміну субструктури і термічну стабільність полігонізаційної субструктури.

**МЕТА РОБОТИ** — встановлення можливості підвищення термічної стабільності полігонізаційної субструктури технічно чистого заліза та сталі У8 шляхом комбінованого деформування.

#### МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оскільки залізо є основою сталей та чавунів, які на сьогодні складають приблизно 90 % з усіх конструкційних матеріалів, що використовують у техніці й побуті, в подальших дослідженнях застосовували технічно чисте залізо марки Э12 (ГОСТ 3836–83). Для дослідження впливу комбінованого деформування на інструментальні сталі обрано сталь У8 (ГОСТ 1435–74), оскільки її використовують для виготовлення інструменту відносно невеликої маси, який працює в умовах, що не викликають нагрівання вище 200...300 °С, наприклад, фрез для обробки пластмас та деревини, штампів холодної штамповки, сокир, викруток, плоскогубців тощо.

Відпалені зразки технічно чистого заліза з метою оптимізації піддавали різним видам комбінованого деформування і наступній ПТО за температури 500 °С з витримкою до 60...70 хв:

– холодне прокатування на 40 % + 40 % статичної деформації;

– холодне прокатування на 30 % + 30 % статичної деформації;

– холодне статичне деформування на 40 % + 40 % статичної деформації під кутом 90°;

– холодне динамічне деформування на 40 % + 40 % статичної деформації.

Термічну обробку зразків здійснювали в лабораторній електричній печі ЧОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Твердість  $HV_5$  визначали на приладі типу «Віккерс» при навантаженні на індентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008), для кожної експериментальної точки проводили 10 вимірювань. Аналіз структури деформованих і термооброблених зразків здійснювали за допомогою оптичного металографічного мікроскопа. Знімки мікроструктур отримували за допомогою скануючого електронного мікроскопа ZEISS Gemini SEM 500. Розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) рентгенівських променів визначали за формулою Шеррера. Зйомку дифрактограм проводили за відображенням на приладі ДРОН-3.0.

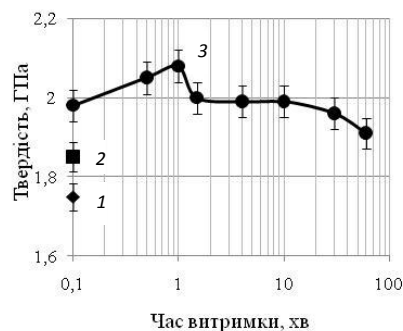
**Об'єкт дослідження** — технічно чисте залізо (Э12) та сталь У8.

**Предмет дослідження** — закономірності процесу формування здрібненої полігонізаційної субструктури з підвищеними фізико-механічними властивостями та її термічної стабілізації у пластично деформованих технічно чистому залізі та сталі У8 після передрекристалізаційної термічної обробки.

#### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Твердість зразків після відпалу складала: технічно чистого заліза — 1,11 ГПа, сталі У8 — 1,87 ГПа.

Для відпалених зразків технічно чистого заліза проводили холодне прокатування на горизонтальному прокатному стані на 40 %, після чого зразок піддавали статичній деформації на 40 % на гідравлічному пресі. Далі проводили ПТО за температури 500 °С з витримкою до 60 хв. Результати впливу ПТО зображено на рис. 1.



**Рис. 1.** Вплив комбінованого деформування (прокатування на 40 % + статична деформація на 40 %) та наступної ПТО на твердість технічно чистого заліза:

1 — твердість після прокатування; 2 — твердість після прокатування й наступного статичного деформування; 3 — твердість після комбінованого деформування та наступної термообробки



З рис. 1 видно, що залежність твердості від тривалості витримки ПТО носить екстремальний характер. Оптимальний час витримки складає 1 хв, що забезпечує найбільше значення твердості 2,08 ГПа, що на 19 % більше, ніж після прокатування, та на 12 % більше, ніж після комбінації прокатування й статичного деформування.

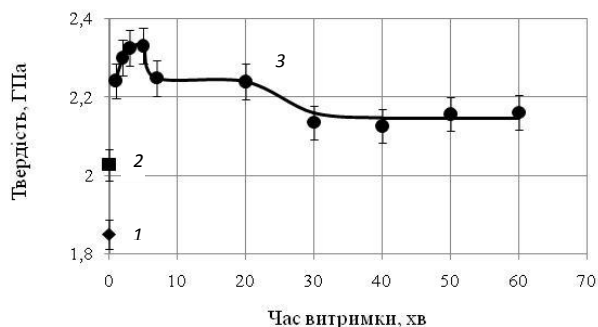
Стабілізація субструктури відбувається в проміжку часу між 1,5 та 10,0 хв, далі твердість починає плавно падати. Твердість стабілізованої структури складає 1,99 ГПа, що лише на 4,5 % нижче від максимального значення.

Твердість за 60 хв витримки складає 1,91 ГПа, що лише на 3 % більше, ніж після комбінованого деформування, тому таку обробку можна застосовувати для деталей з малими розмірами, але для габаритних деталей обробка комбінуванням прокатування та статичної деформації сумарно на 80 % немає сенсу.

Далі для відпалених зразків технічно чистого заліза проводили динамічне деформування ударною циклічною дією на 40 %, після чого зразок повертали на 90° та піддавали статичній деформації на 40 % за допомогою гідравлічного преса. Таким чином, сумарна величина деформації склала 80 %. Передрекристалізаційну термічну обробку проводили за температури 500 °С з витримкою до 60 хв. Результати впливу ПТО зображено на рис. 2.

З рис. 2 видно, що залежність твердості від тривалості витримки ПТО також носить екстремальний характер. Оптимальним часом витримки є 5 хв, яка забезпечує найвищу твердість 2,33 ГПа, що на 25 % більше, ніж після прокатування, та на 15 % більше, ніж після комбінації прокату та статичного деформування.

Характерною особливістю такої обробки є дві ділянки зі стабілізованою структурою: перша — від 7 до 20 хв, друга — від 30 до 60 хв. Комбінування



**Рис. 2.** Вплив комбінованого деформування (динамічне деформування 40 % + статична деформація на 40 % під кутом 90°) та наступної ПТО на твердість технічно чистого заліза:

1 — твердість після динамічного деформування; 2 — твердість після динамічного й наступного статичного деформування; 3 — твердість після комбінованого деформування та наступної термообробки

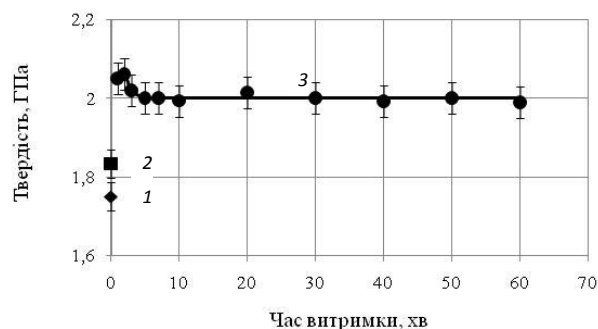
у межах від 7 до 20 хв має сенс, адже приріст твердості відносно сумарної комбінованої деформації складає 11 %, чого не можна сказати про час від 30 до 60 хв, адже приріст твердості у цьому випадку складає лише 6 %.

Загалом така комбінована деформація забезпечує більший приріст твердості, ніж комбінування прокату та статичної після ПТО, яка забезпечує максимальне значення твердості.

Оскільки комбінування динамічної деформації зі статичною під кутом 90° дозволяє отримати більшу твердість, ніж комбінування з прокатом, а також дві ділянки зі стабілізованою полігонізаційною субструктурою, але є складним для реалізації, тому з метою спрощення процедури деформування здійснили комбінування двох статичних деформацій під кутом 90° одна відносно одної.

Після комбінування проводили ПТО за температури 500 °С з витримкою до 60 хв. Результати дослідження наведено на рис. 3. З рис. 3 видно, що за тривалості витримки від 5 до 60 хв відбувається стабілізація полігонізаційної субструктури, про що свідчить постійна твердість 2 ГПа. Також залежність твердості від тривалості витримки носить екстремальний характер, максимальне значення твердості 2,1 ГПа забезпечує термообробка з витримкою впродовж 2 хв, але різниця між найбільшим значенням та стабілізацією складає лише 5 %.

Загалом комбінування двох статичних деформацій під кутом 90° забезпечує практично такий же приріст твердості, як і комбінування прокату і статичного деформування. Твердість після двох статичних деформацій під кутом 90° одна до одної більша на 18 % відносно першого етапу деформування та на 12 % більша, ніж після комбінованої деформації. Із чого можна зробити висновок, що, ймовірно, найбільший приріст і можливість стабілізації субструктури дає комбінування динамічної та статичної деформацій.



**Рис. 3.** Вплив комбінованого деформування (статичне деформування 40 % + статична деформація на 40 % під кутом 90°) та наступної ПТО на твердість технічно чистого заліза:

1 — твердість після 1-ї статичної деформації; 2 — твердість після двох статичних деформацій під кутом 90°; 3 — твердість після комбінованого деформування і наступної термообробки

Для визначення впливу комбінування холодної динамічної та статичної деформації проведено холодну динамічну деформацію технічно чистого заліза на 40 % і наступну статичну деформацію на 40 %. Твердість деформованого зразка складала 2,10 ГПа. Після комбінованої деформації здійснювали ПТО за температури 500 °С. На рис. 4 показана залежність твердості від часу витримки за ПТО.

З рис. 4 випливає, що стабілізація субструктури технічно чистого заліза спостерігається у межах від 10 до 30 хв.

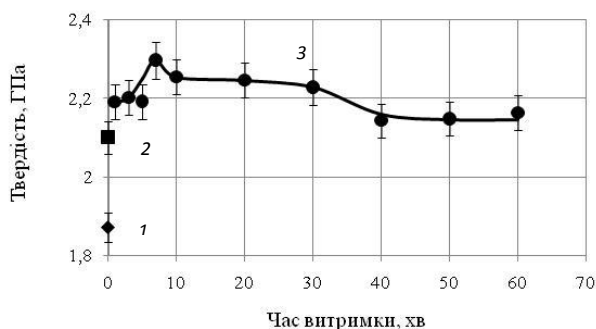
Максимальне значення твердості досягається за витримки 2 хв та складає 2,06 ГПа, що на 18 % більше відносно динамічного деформування та на 12 % більше відносно комбінованої деформації.

Для перевірки впливу величини деформації проведено наступний експеримент: спочатку здійснювали холодну динамічну деформацію на 30 %, потім статичну деформацію на 30 %. Таким чином, сумарна величина деформації складала 60 %.

Отримані зразки після комбінованого деформування нагрівали у печі до температури початку первинної рекристалізації 500 °С. Результати дослідження впливу тривалості витримки на твердість наведено на рис. 5.

Наведені на рис. 5 дані свідчать про термічну стабілізацію полігонізаційної субструктури технічно чистого заліза, оскільки твердість залишається на одному рівні за витримки від 20 до 60 хв. Стабілізація субструктури відбувається за рахунок додаткової деформації матеріалу, що проводили до ПТО. Вона сприяє гальмуванню дислокацій за рахунок утворення дислокаційних перехрещень (потрійних вузлів) [14].

Максимальне значення твердості 2,22 ГПа досягається за витримки 10 хв, що на 10 % більше, ніж після комбінованого деформування. Твердість при



**Рис. 4.** Вплив комбінованого деформування (холодне динамічне деформування на 40 % + статична деформація на 40 %) та наступної ПТО на твердість технічно чистого заліза:

1 — твердість після динамічної деформації; 2 — твердість після динамічного й наступного статичного деформування; 3 — твердість після комбінованого деформування та наступної термообробки

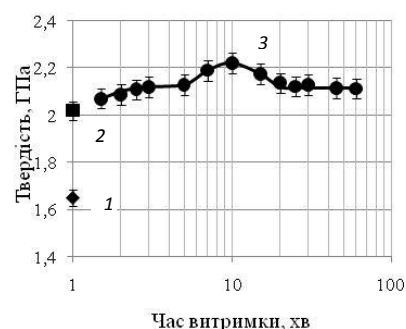
стабілізації субструктури відносно комбіновано деформованого стану більше на 5 %.

У наступних дослідженнях оптимальним видом деформації обрано комбінування холодної динамічної на 30 % та статичної на 30 % деформацій (сумарно на 60 %), оскільки таке комбінування забезпечує задовільні показники твердості, дозволяє стабілізувати полігонізаційну субструктуру технічно чистого заліза, крім того, метод є простим у своєму виконанні. Далі під комбінованою деформацією розуміється саме цей спосіб — комбінування динамічної деформації на 30 % та статичної деформації на 30 %.

Зі збільшенням кількості вуглецю у вуглецевих сталях змінюється їх структура, що обумовлено кількісним співвідношенням двох фаз: фериту та цементиту. Відношення кількості цих фаз, їх розмір, а також характер взаємного розташування і визначають властивості сталі. Чим більше вуглецю, тим більше в сталі твердого та крихкого цементиту, що обумовлюється ростом твердості й зниженням пластичності та в'язкості. Тому для визначення залежності впливу кількості вуглецю на твердість комбіновано деформованих сплавів після ПТО досліджено зразки інструментальної сталі У8.

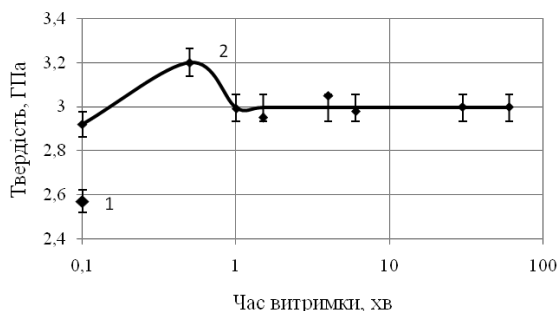
Для забезпечення рівномірного розподілу карбідів сталь піддалася попередній термічній обробці — відпалу за температури 750 °С. Твердість після відпалу складала 1,87 ГПа, а після комбінованого деформування — 2,57 ГПа. Передрекристалізаційну термічну обробку проводили за температури 500 °С, результати дослідження наведено на рис. 6.

Дані рис. 6 свідчать про достатньо високу твердість близько 3,0 ГПа, що на 16 % більше, ніж після комбінованого деформування, яку можливо отримати за витримки протягом 60 хв. Зважаючи на те, що полігонізаційна здрібнена субструктура поєднує високу міцність і твердість з достатньо високою пластичніс-



**Рис. 5.** Вплив комбінованого деформування (холодна динамічна деформація на 30 % + статична деформація на 30 %) та наступної ПТО на твердість технічно чистого заліза:

1 — твердість після динамічної деформації на 30 %; 2 — твердість після динамічного й наступного статичного деформування сумарно на 60 %; 3 — твердість після комбінованого деформування та наступної термообробки



**Рис. 6.** Вплив комбінованого деформування (холодна динамічна деформація на 30 % + статична деформація на 30 %) та наступної ПТО на твердість сталі У8:

1 — твердість після динамічного й наступного статичного деформування сумарно на 60 %; 2 — твердість після комбінованого деформування та наступної термообробки

тю [12], обробку можна ефективно застосовувати для штамів холодної штамповки та слюсарного інструменту зі сталі У8.

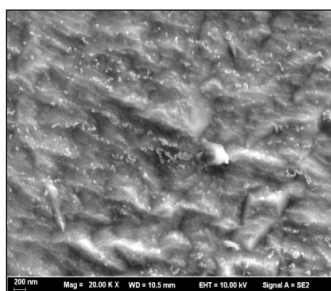
Оскільки у процесі дослідження була встановлена суттєва зміна властивостей металів та сплавів, а саме твердості, тому науковий інтерес становить дослідження субструктури, яка призвела до змін властивостей, а саме розмір областей когерентного розсіювання, кількість наноструктурних елементів та

кут дезорієнтації субзерен. Оскільки ОКР відповідає внутрішній упорядкованій області зерна і не включає у себе дуже спотворених границь, то розмір ОКР ототожнюють із середнім розміром субзерна [15].

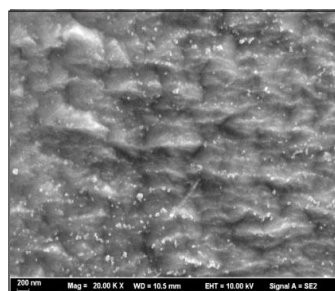
На рис. 7 і 8 наведено субструктури технічно чистого заліза та сталі У8 при збільшенні  $\times 20000$ .

З рис. 7 видно, що відбувається здрібнення субструктурних елементів після ПТО відносно деформованого стану, що підтверджують дані визначені розміри ОКР методами рентгеноструктурного аналізу (табл. 1), згідно з якими відбувається їх зменшення після ПТО відносно деформованого стану. Це є прямим доказом щодо здрібнення субструктури пластично деформованого технічно чистого заліза в процесі передрекristалізаційної термічної обробки.

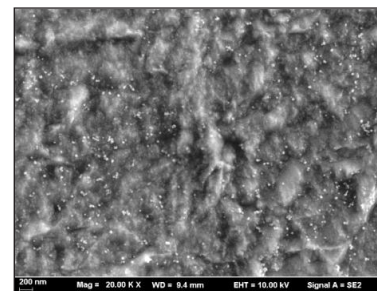
Рисунок 8 показує, що відбувається здрібнення субструктурних елементів після передрекristалізаційної термічної обробки щодо деформованого стану, що підтверджують визначені розміри ОКР методами рентгеноструктурного аналізу (див. табл. 1), згідно з якими відбувається їхнє зменшення після передрекristалізаційної термічної обробки відносно деформованого стану. Це є прямим доказом здрібнення субструктури пластично деформованої сталі У8 у процесі ПТО.



а)



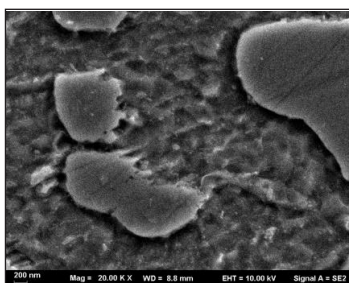
б)



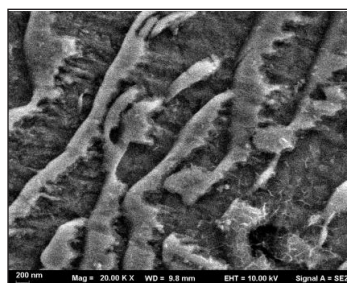
в)

**Рис. 7.** Мікроструктури технічно чистого заліза:

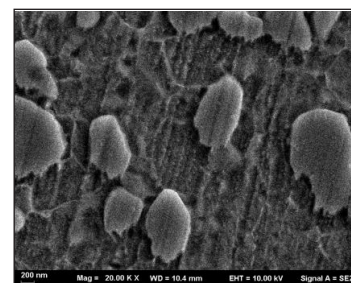
а — після комбінованої деформації; б — після комбінованої деформації і термічної обробки, яка забезпечує максимальні значення твердості; в — після комбінованої деформації та термічної обробки, яка забезпечує термічну стабілізацію полігонізаційної субструктури



а)



б)



в)

**Рис. 8.** Мікроструктури сталі У8:

а — після комбінованої деформації; б — після комбінованої деформації і термічної обробки, яка забезпечує максимальні значення твердості; в — після комбінованої деформації та термічної обробки, яка забезпечує термічну стабілізацію полігонізаційної субструктури

Результати визначення середнього розміру областей когерентного розсіювання деформованого технічно чистого заліза та сталі У8 наведено в табл. 1.

З наведених даних у табл. 1 видно, що розмір ОКР після ПТО при відповідному часі витримки зменшується у порівнянні з деформованим станом металу. Також розмір ОКР корелюється зі значеннями твердості: чим більша твердість, тим менший розмір ОКР. Це свідчить про те, що збільшення значень твердості відбувається в результаті ПТО за рахунок здрібнення субструктури попередньо деформованого металу та підтверджує правомірність висновків щодо термічної стабілізації полігонізаційної субструктури зі зміною твердості.

Властивості матеріалів у значній мірі залежать від відносної кількості наноструктурних елементів, у даному випадку нанорозмірних субзерен, тому визначення частки нанорозмірної складової певною мірою дозволяє прогнозувати властивості матеріалів [16; 17]. Крім того, розміри субзерен свідчать про щільність дислокацій, а кут дезорієнтації субзерен визначає термічну стабільність субграниць.

У табл. 2 наведено відносну кількість наноструктурних елементів, розраховану за методом апроксимації дифракційного профілю, та розрахункові кути дезорієнтації субзерен для деформованих технічно чистого заліза й сталей до і після ПТО.

Наведені в табл. 2 дані свідчать про те, що комбінована деформація та наступна ПТО, яка забезпечує максимальні значення твердості, забезпечують збільшення кількості нанорозмірних субзерен.

Максимальний розмір кута дезорієнтації забезпечує комбіноване деформування з термічною оброб-

кою, яка забезпечує максимум твердості. За витримки 60 хв кут дезорієнтації дещо зменшується відносно максимального значення, але залишається більшим, ніж після деформації. Це й зумовлює підвищену термічну стабільність полігонізаційної субструктури.

### ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Таким чином, комбінована деформація зразків, яка полягає у попередній холодній динамічній деформації та наступній статичній деформації, ймовірно сприяє утворенню субграниць зі збільшеним кутом дезорієнтації. Очевидно, що додаткова статична деформація збільшує кількість структурних недосконалостей у вигляді дислокаційних перехресть.

Рухові дислокації перешкоджають границі субзерен: частинки іншої фази, концентраційні неоднорідності, структурні недосконалості (дислокації), флуктуації в ґратці, пов'язані з нерівномірним розподілом енергії й домішок.

Дислокації, які були введені за деформації, блокуються домішковими атомами, тому під час наступного навантаження ці дислокації не братимуть участі в ковзанні; вони гальмують новоутворені дислокації або частини дислокацій, які розблоковуються після деформаційного навантаження.

Очевидно, що додаткова статична деформація збільшує кількість структурних недосконалостей у вигляді дислокаційних перехресть та потрібних вузлів.

Найбільший кут дезорієнтації спостерігається за максимальних значень твердості. При збільшенні часу витримки він зменшується, але залишається більшим, ніж після комбінованого деформування.

**Таблиця 1.** Середній розмір ОКР комбіновано деформованих зразків технічно чистого заліза до та після ПТО

Режим обробки	Розмір ОКР*, нм	
	Залізо	Сталь У8
Комбінована деформація	190/150	130/190
Комбінована деформація та термообробка 500 °С, 10 хв	125/110	115/150
Комбінована деформація й термообробка 500 °С, 60 хв	175/170	130/160

\*Через «/» вказано розмір ОКР, визначений за формулою Шеррера та методом електронної мікроскопії.

**Таблиця 2.** Відносна кількість нанорозмірних субзерен (%) і кути їх дезорієнтації (°) деформованих технічно чистого заліза та сталей до і після передрекристалізаційної термічної обробки

Обробка	Технічно чисте залізо**	У8**
Комбіноване деформування	54/1,40	28/0,14
Комбіноване деформування та термічна обробка з витримкою, яка забезпечує максимальне значення твердості	75/2,16	42/0,21
Комбіноване деформування та термічна обробка протягом 60 хв	58/1,80	19/0,19

\*\*У чисельнику вказано вміст нанорозмірних субзерен, а у знаменнику — кут дезорієнтації субзерен.



Звідси випливає, що комбіноване деформування з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою забезпечує здрибнення субструктури та збільшує термічну стабільність. Це забезпечує прояв «розмірного ефекту», зокрема підвищення твердості.

**ВИСНОВКИ.** 1. Установлено можливість термічної стабілізації полігонізаційної субструктури в процесі передрекристалізаційної термічної обробки технічно чистих заліза та сталі У8 за 500 °С упродовж 20...70 хв і 10...60 хв відповідно. Досягнути термічної стабілізації полігонізаційної субструктури можливо шляхом проведення холодної динамічної деформації та наступної статичної деформації (30 % + 30 %) і ПТО.

2. Термічна стабілізація полігонізаційної субструктури технічно чистого заліза і сталі У8 пов'язана з підвищеними значеннями кутів дезорієнтації субзерен у порівнянні з комбіновано деформованим станом (30 % + 30 %) 1,4 і 1,8° та 0,14 і 0,19° відповідно.

3. Доведено, що комбінована деформація з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою у запропонованих режимах дозволяє досягнути підвищення твердості технічно чистого заліза та сталі У8 більше, ніж на 10 % порівняно з комбіновано деформованим станом після тривалої витримки до 60...70 хв за температури 500 °С за рахунок здрибнення субструктури до розміру ОКР менше 190 нм.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Дубовий, О. М., Янковець, Т. А., Лебедева, Н. Ю., Казимиренко, Ю. О., Жданов, О. О., & Бобров, М. М. (2011). *Патент України 95378*. Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова.
- [2] Дубовий, О. М., Янковець, Т. А., Шкурят, С. І., & Жданов, О. О. (2010). Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей напилених покриттів. *Електронний вісник НУК*, 2, 7-11.
- [3] Дубовий, О. М., Лебедева, Н. Ю., & Янковець, Т. А. (2010). Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів та сплавів. *Металознавство та обробка металів*, 3, 7-10.
- [4] Дубовий, О. М., Кулік, С. Г., Жданов, О. О., Бобров, М. М., & Мирко, О. І. (2011). Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки. *Зб. наук. пр. НУК*, 2, 36-44.
- [5] Дубовий, О. М., Жданов, О. О., & Горбань, О. В. (2014). Можливості стабілізації полігонізаційної субструктури сплаву Д16. *Металознавство та обробка металів*, 2 (70), 34-39.
- [6] Дубовий, О. М., Бондаренко, А. В., Жданов, О. О., Жижко, О. В., Бобров, М. М., & Галкіна, Т. С. (2012). Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на субструктуру і твердість деформованих кольорових металів і сплавів та напилених покриттів. *Зб. наук. пр. НУК*, 2 (443), 47-53.
- [7] Дубовий, О. М., Лебедева, Н. Ю., Янковець, Т. А., Карпеченко, А. А., & Жданов, О. О. (2010). Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою. *Зб. наук. пр. НУК*, 3 (432), 69-79.
- [8] Бейли, Дж. Е. (1968). *Електронно-микроскопические наблюдения процессов возврата и рекристаллизации в наклепанных металлах*. М.: Металлургия.
- [9] Чашухина, Т. И., Дегтярев, М. В., & Воронова, Л. М. (2001). Влияние способа деформации на изменение твердости и структуры армо-железа и конструкционной стали при деформировании и последующем отжиге. *ФММ*, 5, 75-83.
- [10] Новиков, И. И. (1978). *Теория термической обработки металлов*. М.: Металлургия.
- [11] Балоян, Б. М., Колмаков, А. Г., Алымов, М. И., & Кротов, А. М. (2008). *Нanomатериалы: Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. Учебное пособие*. Международный университет природы, общества и человека «Дубна».
- [12] Жданов, О. О. (2015). *Закономірності впливу передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості деформованих сталей*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук.: спец. 05.02.01 – «Металознавство» / Жданов Олександр Олександрович. – Херсон.
- [13] Коновалов, А. В., & Смирнов, А. С. (2015). Влияние динамического деформационного старения сплава АМг6 на сопротивление деформации. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*.
- [14] Горелик, С. С., Добаткин, С. В., & Капуткина Л. М. (2005). *Рекристаллизация металлов и сплавов*. М.: МИСИС.
- [15] Альмяшева, О. В., Федоров, Б. А., Смирнов, А. В., & Гусаров, В. В. (2010). Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях. *Наносистемы: физика, химия, математика*, 1, 26-36.
- [16] Долгушева, Е. Б., & Трубицын, В. Ю. (2010). Влияние размера и формы свободных наночастиц на локальные изменения параметра решетки и структурную стабильность ОЦК-Zr и Fe. *Физика твердого тела*, 52, 6, 1163-1171.
- [17] Марахова, А., Жилкина, В., Блынская, Е., Алексеев, К., & Станишевский, Я. (2016). Определение размеров наночастиц в коллоидных растворах методом динамического рассеяния света. *Нано Индустрия*, 1/63, 88-93.

© О. М. Дубовий, Т. О. Макруха

Надійшла до редколегії 14.05.2019

Статтю рекомендовано до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький